第 41 卷 第 4 期
2023 年 12 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41, No. 4
Dec., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.04.02

利用 N 体模拟研究银河系与仙女座星系的并合

周宇凡[1,2]，李志远[1,2]，常 江[3]

(1. 南京大学 天文与空间科学学院，南京 210046； 2. 现代天文与天体物理教育部重点实验室，南京 210046； 3. 中国科学院 紫金山天文台，南京 210034)

摘要： 银河系的邻居仙女座星系 (M31) 是本星系群中恒星质量最大的成员。观测表明，M31 正与银河系相互接近，且两者极有可能在未来发生并合。 N 体模拟作为研究星系并合的有力工具，在过去半个世纪内取得了长足的发展，也在有关银河系与 M31 并合的定量研究中发挥了巨大的作用。随着星系结构理论的丰富、观测水平的提高以及 N 体模拟软件技术的成熟，银河系与 M31 并合的图像也越来越清晰与完善。简要介绍了银河系与仙女座星系并合模拟研究的工作流程，回顾了各步骤所用到的理论模型或软件条件于近几十年内取得的发展，选取各阶段代表性模拟结果进行比较；最后给出了未来的研究趋势与改进方向。

关 键 词： N 体模拟；银河系；仙女座星系；并合；本星系群

中图分类号： P157.9 **文献标识码：** A

1 引 言

本星系群 (Local Group, LG) 包含银河系 (Milky Way, MW)、仙女座星系 (Messier 31, M31)、三角座星系 (Messier 33, M33)、麦哲伦云等近百个大小不一、形态各异的星系[1]，有关本星系群的研究对于理解星系间相互作用、星系演化进程、宇宙学等具有重大意义。其中，M31 是本星系群内恒星质量和光度最大的星系[2]，与银河系一起构成了一个可用于研究星系作用与结构演化的“天然实验室”。按照宇宙学的等级成团理论，星系是并合增长的。本星系群中不仅有众多卫星星系的并合，未来还可能发生银河系与 M31 这两个大质量星系的并合。

收稿日期： 2023-02-17； **修回日期：** 2023-04-23

资助项目： 国家自然科学基金 (11873028, 12225302)

通讯作者： 周宇凡，yufanz@smail.nju.edu.cn

主流观点认为[3]，本星系群已经与宇宙膨胀解耦，不再受到哈勃流 (Hubble flow) 的影响，或者说，本星系群内部的星系已经构成一个引力束缚系统。因此在万有引力作用下，银河系与 M31 存在最终碰撞以及并合的可能性。观测结果显示，M31 确实具有朝向银河系的径向速度，Binney 和 Tremaine[4]于 1987 年给出该相对速度约为 $-120\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$；而近些年给出的最新径向速度略低，约为 $-109\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$[5]。由于切向速度对两者的相对运动也存在较大影响，因此在 M31 的自行被测定之前，仅仅通过径向速度无法完全确定它是否会与银河系并合，不过人们可以根据本星系群提供的其他信息 (如相关星系的局部结构特征、某些矮星系的轨道等) 间接推断出 M31 切向速度的可能区间，并进行试验性的模拟工作。过去 10 年间，对 M31 自行的测量已经取得初步的结果[6]，相关工作对银河系与仙女座星系未来并合事件的描述也愈加准确。

自 20 世纪 70 年代 Toomre A 和 Toomre J[7]利用计算机粒子数值模拟研究星系间相互作用以来，数值模拟技术 (包括 N 体动力学模拟和流体模拟) 不断发展并成为研究星系演化、星系并合的重要工具。在人们根据观测数据以及理论分析推断出银河系与 M31 存在并合的可能性后，能较好描述星系具体结构与星体运动的 N 体模拟工作也逐步开展，给出了关于银河系与 M31 并合的定量结论，如两者完成并合的时间、并合完成后太阳可能所处的位置等。银河系与 M31 并合的过程图像也在不断更新优化，这种更新主要基于三个方面：(1) 星系结构理论的丰富，人们在构建星系模型时能够选择更多种类的分布轮廓来拟合[8–11]，可以用更合适的数学模型来描述星系的各个组成成分 (暗物质晕、星系盘、核球等)；(2) 观测水平的提高，星系总质量 (这里一般指位力质量)、星系各组分质量占比、星系尺度 (标长、标高、半光半径等) 等参数愈加明晰[12–14]，M31 的运动学参数愈加精确[6, 15]；(3) N 体模拟软件技术的成熟[16, 17]，不仅包括程序的完备化与便捷化，也包括算法的优化以及处理数值模拟中特殊问题的经验积累。

值得指出的是，所谓“理想星系并合”的模拟通常注重研究不同物理参数 (如质量比、角动量等) 对并合结果的影响，并聚焦于并合对星系中心超大质量黑洞活动性的影响，这方面工作的综述可见参考文献[18]。而银河系与 M31 的并合，作为星系并合的一个特例，有其他并合系统所不具备的观测限制。

本文将回顾几十年来银河系与 M31 并合模拟的研究进展。值得强调的是，文章按照星系并合 N 体模拟的操作流程展开，简要介绍各步骤中所用到理论模型与软件条件的更新与发展，旨在让读者能够利用文章中介绍的知识与工具自主实现银河系与 M31 的并合模拟，因此本文也可以作为星系并合 N 体模拟工作的参考手册。

第 2 章将介绍银河系与 M31 基本参数的选取以及物质分布轮廓的选择，表明基础理论发展与观测数据更新对上述选择的影响；第 3 章将介绍模拟所需初始条件文件的生成，主要包括单个星系初始条件生成器的开发，以及人们对星系空间关系和速度关系的认知进展；第 4 章将介绍 N 体模拟所用软件，简述相关软件的更新以及问题处理经验的积累；第 5 章将展示所选代表性工作的模拟结果；第 6 章将进行总结并提出有价值的未来研究方向。

2 星系模型的构建

星系包含暗物质、恒星、气体、中心黑洞等成分， N 体模拟重点考虑的是暗物质晕与恒星，其中恒星主要存在于星系盘与核球之中。为了进行银河系与 M31 的数值模拟工作，首先要确定星系的基本参数，主要包含：星系质量、暗物质晕的晕聚集度[1] (描述星系中物质聚集程度，定义为 $c = r_{200}/r_{\rm s}$，其中 c 为晕聚集度，$r_{\rm s}$ 为标长，暗物质晕在半径为 r_{200} 球体内的平均密度为 200 倍宇宙临界密度)、自转参数[19] (spin parameter，一般用字母 λ 表示，表征星系总角动量)、星系各组分 (暗物质晕、星系盘、核球等) 质量、星系各组分尺度 (半径、厚度等)。

不过，以上基本参数尚不足以勾勒出星系的形态结构，还需要知道质量在星系中是如何分布的，这就需要选取合适的分布函数对各个成分进行拟合。

值得一提的是，为了使所构建的星系更加真实可信，总质量固定的情况下，人们会调整某些参数细节，试图使其自转曲线与观测到的星系自转曲线在某一半径范围内尽量符合，这也为模拟得到的某些具体结论 (如银河系与 M31 并合后太阳将处于何处) 增添说服力。

本章将回顾近些年来人们对银河系与 M31 质量的选取随观测数据更新而产生的变化，接着介绍几种星系数值模拟中经典的分布轮廓，最后简单展示相关数值模拟工作中构建出的银河系与 M31 模型。

2.1 银河系与 M31 的质量

前文提到的星系参数有若干个，而此处着重讨论质量，一方面是因为两个星系各自的质量显然是所有参数中对两者未来演化影响最大的；另一方面，正如前文所述，人们会在确定星系质量后调整其他参数 (如晕聚集度、恒星质量占总质量的比例等) 使其旋转曲线接近真实情况，所以这些参数并不一定是由观测得到，而是根据一些分析计算与试探性模拟选取的。下面我们回顾人们对银河系和 M31 质量的认知演化以及在相关模拟工作中选取的数值。

早期人们对于银河系与 M31 质量的估计分为两个环节，第一个环节是确定本星系群总质量，第二个环节是确定银河系与 M31 的质量比。对本星系群总质量的估计主要依靠计时推理法 (timing argument)。这一技术最早于 1959 年由 Kahn 和 Waltjer[20] 开创，其核心思想是认为银河系与 M31 在宇宙致密早期阶段诞生时非常接近，接着由于宇宙膨胀而相互远离，随后这种远离的运动又发生反转，两者在引力作用下相互靠近，如今它们的轨道已经完全符合开普勒定律。Binney 和 Tremaine[4] 于 1987 年的工作中应用了该技术，在确定银河系与 M31 的距离、径向相对速度、宇宙年龄后，分析出本星系群的总质量应大于 $3\times10^{12}\,M_{\odot}$；同时他们也估算出银河系与 M31 的下一次近心点时刻将于 4 Ga 以后到来。当然这只是一个粗略的结果。在给出本星系群总质量后，人们认为其主要由银河系与 M31 这两个星系贡献，但也有理论认为星系际介质 (intergalactic medium, IGM) 对总质量的贡献不可忽略，这里为简单说明原理而暂不考虑之。利用

[1] 更一般地说是暗物质晕的质量分布轮廓。晕聚集度只是其中较常见的一种参数，常用于本文 2.2.2 节提到的 NFW 轮廓。

星系旋转曲线平坦部分的数值以及 B 波段观测到的星系盘标长：$V_{\mathrm{MW}} = 220\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$、$R_{\mathrm{MW}} = (4.5\pm1.0)\,\mathrm{kpc}$ (由 Freeman[21] 在 1987 年给出)、$V_{\mathrm{M31}} = 260\,\mathrm{km}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (由 Braun[22] 在 1991 年给出)、$R_{\mathrm{M31}} = (5.8\pm0.3)\,\mathrm{kpc}$ (由 Walterbos 和 Kennicutt[23] 在 1988 年给出)可以计算出 M31 与银河系质量比：$M_{\mathrm{M31}}/M_{\mathrm{MW}} = (R_{\mathrm{M31}}V_{\mathrm{M31}}^2)/(R_{\mathrm{MW}}V_{\mathrm{MW}}^2) \approx 1.9$。或者根据 Tully-Fisher 关系[24]：

$$M \propto V^{\alpha} \quad , \tag{1}$$

取 $\alpha = 3 \sim 4$，可得 $M_{\mathrm{M31}}/M_{\mathrm{MW}} \approx 1.5 \sim 2$。上述讨论详见 Raychaudhury 和 Lynden-Bell[25] 1989 年的工作。

几乎是最早的利用 N 体模拟完整描述银河系与 M31 未来并合过程的工作——Dubinski 等人[26] 于 1996 年发表的工作 (下文简称 D96)，根据当时由计时推理法得到的结果选取了两个本星系群总质量可能值：$M_{\mathrm{LG,low}} = 1.6\times10^{12}\,M_{\odot}$、$M_{\mathrm{LG,high}} = 5.3\times10^{12}\,M_{\odot}$。同时也根据前文中的有关计算确定银河系与 M31 的质量比 $M_{\mathrm{MW}} : M_{\mathrm{M31}} \approx 1:2$。因此该工作中两组模拟采用的银河系与 M31 质量分别为 $M_{\mathrm{MW,1}} = 5.0\times10^{11}\,M_{\odot}$、$M_{\mathrm{M31,1}} = 1.1\times10^{12}\,M_{\odot}$ 以及 $M_{\mathrm{MW,2}} = 1.7\times10^{12}\,M_{\odot}$、$M_{\mathrm{M31,2}} = 3.6\times10^{12}\,M_{\odot}$。

2002 年，Klypin 等人[12] 采用另一种方法给出了银河系与 M31 的质量。他们从一些基础理论出发构建一系列模型，这些模型的总质量、质量分布、旋转曲线、具体结构形态等各不相同；接着根据星系的观测数据给定一系列限制条件 (比如距星系中心一定范围内所包含的质量为多少)，调整各模型的参数细节以进行拟合，经反复试验，当某个模型成功与约束条件兼容，便认为该模型是合理的。该工作并不意欲寻找“最好”的模型与参数,所以最终给出了一系列符合所选取约束条件的银河系与 M31 模型，而作者认为其中最“合理”(指星系盘质量、晕聚集度等参数在各自可能的取值区间内最为适中) 的两个星系模型质量分别为： $M_{\mathrm{MW}} = 1.0\times10^{12}\,M_{\odot}$、$M_{\mathrm{M31}} = 1.6\times10^{12}\,M_{\odot}$。该数值在 Cox 和 Loeb[3] 2008 年的 N 体模拟工作 (下文简称 C08) 以及 Schiavi 等人[27] 2020 年的 N 体模拟工作 (下文简称 S20) 中被采用。

2012 年，van der Marel 等人[5] 根据哈勃空间望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 对 M31 的观测数据，运用计时推理法，结合前人文献中的一些讨论，得出新的本星系群总质量：$M_{\mathrm{LG}} = (3.17\pm0.57)\times10^{12}\,M_{\odot}$。21 世纪以来，在 van der Marel 这篇文章发表前，也存在其他利用计时推理法估计本星系群质量的工作 (详见参考文献 [5] 中的介绍及其参考文献)，它们给出的质量更大，大于人们普遍认为的银河系与 M31 质量之和，因此 N 体模拟工作中必须添加星系际介质以使模拟包含的总质量与本星系群总质量相符；而该较小的本星系群质量估计结果出现后，银河系与 M31 的并合模拟工作中星系际介质便不再是必须考虑的成分。同时，这一工作对于银河系与 M31 的质量比也给出了不同的结果，与结果 1 : 2 相比，其认为最新的结果接近于 1 : 1。于是 van der Marel 等人[28] 在同系列另一篇文章中采用 $M_{\mathrm{MW}} = M_{\mathrm{M31}} = 1.5\times10^{12}\,M_{\odot}$ 的星系质量进行了 N 体模拟工作 (下文简称 V12)。

随着越来越多观测数据 (如 Gaia 数据) 的发布，银河系与 M31 质量的研究结果也越来越丰富。如 2019 年 Watkins 等人[13] 根据 Gaia DR2 数据，结合其他工作分析出银河系

质量应为 $M_{\rm MW} = 1.54^{+0.75}_{-0.44} \times 10^{12}\,M_\odot$，这与 V12 中所采用的银河系质量相符。然而银河系与 M31 的质量比并没有一个公认的结果，1 : 2 和 1 : 1 或者其他比值，都存在可能性。Patel 等人[29]于 2017 年的一项研究大麦哲伦云与 M33 轨道历史的工作中，对银河系与 M31 各构建了两个模型，其中 $M_{\rm MW,1} = 1.0 \times 10^{12}\,M_\odot$、$M_{\rm MW,2} = 1.5 \times 10^{12}\,M_\odot$、$M_{\rm M31,1} = 1.5 \times 10^{12}\,M_\odot$、$M_{\rm M31,2} = 2.0 \times 10^{12}\,M_\odot$，van der Marel 等人[15]于 2019 年再次进行的 N 体模拟工作 (下文简称 V19) 中采用上述 1 : 2 和 1 : 1 两种质量比模型分别进行了模拟。

对于银河系与 M31 质量的研究与争论也从未终结。2022 年底，Patel 和 Mandel[14]根据 4 个卫星星系 (M33、NGC185、NGC147、IC10) 的轨道数据，给出 M31 的质量可能为 $M_{\rm M31} = 2.81^{+1.48}_{-0.75} \times 10^{12}\,M_\odot$ 甚至 $M_{\rm M31} = 2.99^{+1.32}_{-0.68} \times 10^{12}\,M_\odot$，这比之前的估计值要高很多。这也为未来的模拟工作提供新的可能参数。

2.2 物质分布轮廓

星系由暗物质晕、星系盘 (恒星盘与气体盘)、核球等成分组成，各成分所包含的物质分布形式一直是人们感兴趣的话题。星系数值模拟工作中，由于要在计算机上构建星系模型，合理的物质分布函数表达式便显得尤为重要。过去几十年间，经过大量工作的试验与讨论，不少物质分布轮廓被提出。具体的研究过程与发展历程十分复杂，这里不加赘述，仅介绍 N 体模拟中最常用的几种分布。

2.2.1 Hernquist 轮廓 (适用于核球与暗物质晕)

人们很早就认识到，椭圆星系以及星系核球的面亮度分布可以被 de Vaucouleurs[30]的 $R^{1/4}$ 定律很好地描述：

$$\lg\left[\frac{I(R)}{I(R_{\rm e})}\right] = -3.331\left[\left(\frac{R}{R_{\rm e}}\right)^{1/4} - 1\right] \quad , \tag{2}$$

其中，R 为距星系中心的投影半径，$R_{\rm e}$ 为有效半径或者半光半径，I 为表面亮度。尽管该函数形式能很好地描述椭圆星系以及星系核球，它所对应的空间密度分布函数却没有解析解[31]，也就难以用于理论分析，所以寻找一个便于解析且投影面亮度轮廓类似于 $R^{1/4}$ 的空间密度函数就显得尤为重要。经过一些尝试，最终 Hernquist 轮廓[10]问世，其密度轮廓为：

$$\rho(r) = \frac{M}{2\pi}\frac{a}{r}\frac{1}{(r+a)^3} \quad , \tag{3}$$

其中，ρ 是密度，M 是质量，a 是标长，r 是距星系中心的三维半径。这一轮廓在星系数值模拟中被广泛使用，通常被用来描述核球以及暗物质晕的物质分布。

2.2.2 NFW 轮廓 (适用于暗物质晕)

Navarro 等人[11]提出的 NFW (Navarro-Frenk-White) 密度轮廓表达式为：

$$\frac{\rho(r)}{\rho_{\rm crit}} = \frac{\delta_{\rm c}}{(r/r_{\rm s})(1+r/r_{\rm s})^2} \quad , \tag{4}$$

其中，ρ 是密度，δ_{c} 是无量纲化的特征密度，r_{s} 是标长，r 是距星系中心的三维半径，ρ_{crit} 是闭合临界密度：

$$\rho_{\mathrm{crit}}=\frac{3H^2}{8\pi G}\quad , \tag{5}$$

其中，H 是哈勃常数，G 是万有引力常数。

NFW 轮廓一般仅被用于描述暗物质晕的物质分布，其与 Hernquist 轮廓最大的不同在于极远处的渐进行为：当 $r \gg r_{\mathrm{s}}$ 时，NFW 轮廓函数趋于 r^{-3} 而 Hernquist 轮廓函数趋于 r^{-4}。所以，对于同等质量的星系暗物质晕，采用 NFW 轮廓描述会使其分布得比采用 Hernquist 轮廓时更“扁平”，且质量不收敛，因此，NFW 轮廓在应用时通常要搭配一个人为设置的截止半径。

如果模拟只对宏观的结果 (如两星系最终并合的时间) 感兴趣而不在乎星系内部细节，那么星系盘与核球选择何种轮廓影响并不大；而暗物质晕占据着星系高于 90% 的绝大部分质量，决定着星系延伸至何处，所以暗物质晕的分布轮廓对模拟结果影响明显。Springel 等人[19]指出：Hernquist 轮廓在靠近中心的部分与 NFW 轮廓极其相似，而因为其轮廓曲线在外部下降得比 NFW 更快所以总质量收敛，于是采用 Hernquist 轮廓描述暗物质晕时便不需要人为设置截止半径；另外，Hernquist 轮廓具有可解析的分布函数形式，这样在分析时比 NFW 轮廓方便得多。综上所述，Hernquist 轮廓比 NFW 轮廓更适合在 N 体模拟中描述暗物质晕。

2.2.3　指数轮廓 (适用于星系盘)

指数轮廓表达式为：

$$\rho(R)=\frac{M}{2\pi h^2}\exp(-R/h)\quad , \tag{6}$$

其中，ρ 为密度，M 为质量，h 为标长，R 是距星系中心的二维半径，这一轮廓经常用来描述星系盘的物质分布。由于星系盘并不是一个球对称系统，上述表达式仅能描绘径向分布，如果要完整表示三维空间中盘的物质分布，还需要加上一个纵向成分，比如 sech^2 项，则指数轮廓变为：

$$\rho(R,z)=\frac{M}{4\pi z_0 h^2}\mathrm{sech}^2\left(\frac{z}{2z_0}\right)\exp(-R/h)\quad , \tag{7}$$

其中，z 为距离盘面的高度，z_0 为标高。

2.2.4　Miyamoto-Nagai 盘 (适用于星系盘)

为了描述轴对称且有厚度的星系盘，Miyamoto-Nagai 盘[9]被引入，这是构建星系模型时常见的一种分布，它的势函数为：

$$\varPhi(R,z)=-\frac{GM}{\sqrt{R^2+(R_{\mathrm{d}}+\sqrt{z^2+z_{\mathrm{d}}^2})^2}}\quad , \tag{8}$$

其中，$\varPhi$ 为势，G 为万有引力常数，M 为质量，R 为距星系中心的二维半径，z 为距离盘面的高度，R_{d} 与 z_{d} 为标长与标高。

随着 R_{d} 与 z_{d} 取值的变化，该势函数可以描述从薄盘到球等多种模型，模型无奇点且函数简洁，模拟时的计算成本比指数盘等复杂的轮廓更低。

2.2.5 Plummer 球 (适用于核球)

Plummer 球[8]的势函数为：

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{\sqrt{r^2 + a^2}}, \tag{9}$$

其中，Φ 为势，G 为万有引力常数，M 为质量，r 为距星系中心的三维半径，a 为标长。该模型一般用于拟合星系核球，在某些特别的工作中对于不需要分辨具体细节的星系也可以使用该模型。比如研究卫星星系绕大星系运行的轨道时，不需要分辨卫星星系内部诸如星系盘、核球之类的具体细节，这时就可以用一个 Plummer 球来表示整个卫星星系[29]。

2.3 银河系与 M31 模型示例

在确定了星系参数与各成分分布轮廓后，星系模型也就基本构建完成。下面以 C08 为例介绍其中选用的银河系与 M31 模型。此模型中的星系参数由前文提到的 Klypin 等人[12]在 2002 年的工作给出，其也在 S20 中被采用。

表 1 展示了 C08 与 S20 选取的星系参数，其中暗物质晕和核球采用 Hernquist 轮廓，星系盘采用指数轮廓。

表 1　C08 与 S20 中采用的星系模型[12]

参数	MW	M31
$V_{200}\,/\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$	145	170
$M_{200}\,/\,10^{12}M_{\odot}$	1.0	1.6
c	12	12
λ	0.031	0.036
m_{d}	0.041	0.044
$R_{\mathrm{d}}\,/\,\mathrm{kpc}$	2.2	3.6
f	0.3	0.3
m_{b}	0.008	0.012
$a\,/\,\mathrm{kpc}$	0.4	0.7

注：选自 C08 中的表 1。第 2−10 行分别指位力速度、位力质量、晕聚集度、自转参数、星系盘质量分数 (星系盘质量占星系总质量的比例)、星系盘标长、星系盘中气体比例 (严格意义上 N 体模拟不包含气体，此处也用到一部分流体模拟)、核球质量分数 (核球质量占星系总质量的比例)、核球标长。

不过，星系模型并不一定要完全按照这一示例，星系参数并不一定是表中所列，读者可以查阅前文提到的另外三个工作[15, 26, 28]进行对比。另外，物质分布轮廓也可以根据需要调整，比如 V12 中的核球即采用 $R^{1/4}$ 轮廓；Patel 等人[29]对银河系与 M31 的暗物质晕采用 NFW 轮廓，对星系盘采用 Miyamoto-Nagai 盘。但近些年的 N 体模拟中，“Hernquist 暗物质晕+ 指数盘+Hernquist 核球”似乎是一个比较“优质”的选择，本文 2.2.2 节与 3.1 节的相关内容对此给出解释。

3 星系初始条件文件的生成

银河系与 M31 的理论模型构建成功后，研究人员需要在计算机中将它们创建出来，这是一个比较耗费精力的步骤。随着模拟工作“程式化”程度越来越高，人们迫切希望能有一个工具——只要输入参数就可以生成一个由大量粒子表示的星系。近 20 年来 (尤其是最近 10 年)，几款初始条件 (initial condition, IC) 文件生成器公开发布，大大简化了该步骤的流程。

然而即使如此，这一步骤也并没有那么简单。 N 体模拟所用的 IC 文件对模拟的结果起着决定性作用，生成一个好的 IC 文件对于整个工作是极其重要的。虽然 IC 文件生成器的出现使操作更加便捷，但如果要生成质量很高、平衡稳定 (仅仅将一堆粒子堆砌在一起，这个星系必然是不稳定的，因此每个粒子的初始位置和初始速度都应当恰到好处) 的星系，IC 文件生成器可能仍然要运算很长时间，甚至在某些情形下，生成初始条件所花的时间比之后进行模拟的时间更久。此外，IC 文件生成器往往存在一定的局限性，因为它在编写时可能是针对某种特定的情境所编写，生成的星系文件并不一定完全符合使用者的要求。

部分 IC 文件生成器的输出文件只可包含一个星系，这样在分别生成银河系与 M31 的 IC 文件后，还需要人工将两者合并成一个新 IC 文件，输出文件包含多个星系的 IC 文件生成器也只是将合并这一步骤内置。而在合并时，银河系与 M31 的相对位置和相对速度尤为重要，随着观测的进步，这些数据也在不断更新、完善。

本章将首先介绍几款星系 IC 文件生成器，分析它们的功能与缺陷；之后介绍相关 N 体模拟工作中，人们对银河系与 M31 相对位置和相对速度的理解随观测数据更新而产生的改变。

3.1 星系初始条件生成器

2014 年，Yurin 与 Springel[16]发布了一款 IC 文件生成器——GALIC (GALaxy Initial Conditions)。

GALIC 是一个从初始参数条件出发，使用迭代方法构建 N 体星系初始条件文件的开源代码。它从初始粒子速度出发，将由粒子轨道产生的时间平均密度响应与初始密度分布的差异，用一个价值函数进行表征，通过迭代调整初始速度从而最小化该价值函数，继而得到无碰撞玻尔兹曼方程的稳定解。对于给定的密度结构，由于分布函数通常不唯一，所以代码中用额外的约束来丰富价值函数，进而得到最理想的解。速度调整则采用随机过程进行，但只有当其改善了拟合结果时才会被保留。代码中使用的方法收敛迅速且较为灵活，是构建星系 IC 文件的强大工具。

GALIC 创建出的星系包含暗物质晕、恒星盘、核球三个成分 (无法生成气体)，其中暗物质晕和核球采用 Hernquist 轮廓[10]，恒星盘采用指数轮廓。这一轮廓组合也是 Springel 在一系列工作中所采用的，因此“Hernquist 暗物质晕+指数盘+Hernquist 核球”模式的星系被广泛接受和使用。

在下载并编译好 GALIC 后，只要在参数文件中输入星系基本参数以及星系各成分粒子

数，就可以利用它创建一个孤立星系的 IC 文件，并且 GALIC 支持并行计算以节约制作 IC 文件的时间。不过 GALIC 存在很大的局限性：首先，物质分布轮廓被限定，使用者无法选择其他轮廓；其次，生成的 IC 文件无法包含气体、中心黑洞等成分。需要注意：虽然参数文件里有设定黑洞质量的选项，但公开发行的版本里漏写了生成黑洞的部分，即使填写了相关参数也并不会真的有黑洞生成。如有可能，使用者须自己对相关代码做出修改。

同一年，另一款功能更为强大的 IC 文件生成器 DICE[32] (Disk Initial Conditions Environment) 发布，它的自由度比 GALIC 高很多。DICE 可以任意添加星系成分，且有 16 种较为常见的分布轮廓，因此星系各成分质量分布的选项大大增加，这使其可生成的星系形态极为丰富 (甚至不一定是星系)：盘星系、椭圆星系、旋臂、孤立恒星、星流……并且 DICE 内置了合并两个孤立星系 IC 文件的操作，使用起来更加便捷。不过 DICE 也存在一定缺陷：由于自由度太高，可供设置的参数太多，冗长的参数文件让人眼花缭乱，并且生成的 IC 文件中可能额外存在研究者并不感兴趣的参数 (如恒星的年龄、金属丰度)。

除了公开发行的 IC 文件生成器，还存在一些未公开的代码。如许多研究者使用了 Springel 的 MakeDisk (或 MakeGalaxy) 代码及其修改版，这些代码使用广泛但必须得到 Springel 或者合作者的许可。值得注意的是，一些代码对 NFW 轮廓的暗物质晕考虑了绝热收缩：重子冷却并聚集在暗物质晕中心，这一过程将会加深暗物质晕中心区域的重力势阱。绝热收缩效应对星系的轮廓尤其是速度轮廓影响显著，经其修正后的 NFW 暗物质晕更加合理[33]。

一般来说，生成孤立星系的 IC 文件后，需要让它独自演化一段时间。一方面检验稳定性，研究其结构是否会随时间而改变；另一方面对 IC 文件进行弛豫化处理，使其内部分布更加自然。如果生成的 IC 文件质量足够高，这一步骤可能并不必要，对最终模拟结果的影响不大。但是在某些复杂的模拟工作中，这不可或缺。这一步骤并未被 IC 文件生成器内置，是因为其通常需要大量的计算资源，导致计算时间显著增加；另外，如果将这一步骤直接置入 IC 文件生成器，那么每次需要重新生成 IC 文件时都要执行完整演化过程，使程序变得繁琐且难以维护。

3.2 M31 的运动学参数

分别生成银河系与 M31 的 IC 文件后，就要根据两者的空间位置关系以及相对速度将它们组合成最终模拟使用的 IC 文件，那么，对 M31 的相关测量结果就显得尤为重要。

对 M31 的距离以及视向速度，人们很早就开始研究。在 D96 中，Dubinski 等人选用了 700 kpc 的星系距离以及 $-130\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$的径向速度。但根据 M31 自行计算的切向速度直到 2012 年才被正式测定[5]，所以在早期的工作中切向速度的选择可能会参照某些特别的标准。如 D96 并不是纯粹进行银河系与 M31 并合模拟的工作，主要目的是研究潮汐尾与暗物质晕间的关联，所以通过拟合潮汐尾的形态限制并设置了 M31 的切向速度 ($20\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 和 $26\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$)[26]。并且该工作已经考虑到星系盘平面与轨道平面不一致，给银河系与 M31 设置了相应的倾角。

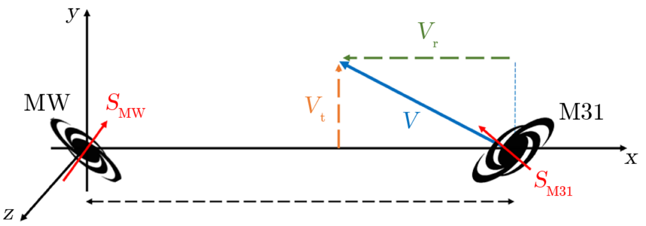
2005 年，McConnachie 等人[34]与 Ribas 等人[35]研究发现，银河系与 M31 的距离大约

为 780 kpc，这一数值被 C08 采用。不过 C08 的开始时刻并不是现在，其模拟是从更早的时刻开始，当时银河系与 M31 的距离更远。当两者距离演化至 780 kpc，此时被定义为新的“初始时刻”，而根据模拟中的数据，此刻 M31 相对银河系的径向速度为 $-135\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，切向速度为 $132\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，这也是对于 M31 初始速度的一种独特设定方式，不过显然会导致星系的速度和倾角并不完全符合实际。另外，C08 的最终 IC 文件中除了包含银河系与 M31，还包含质量 $M=2.6\times10^{12}\,M_{\odot}$ 的 IGM。

2012 年，M31 的自行终于被首次测定[6]，HST 得到的相关数据[5]为：M31 的距离 $D=(770\pm40)\,\mathrm{kpc}$，相对银河系的径向速度 $V_{\mathrm{rad}}=(-109.2\pm4.4)\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$、切向速度 $V_{\mathrm{tan}}=17.0\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ (在 1σ 的置信区间内：$V_{\mathrm{tan}}\leqslant34.3\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$)。V12 采用了上述结果进行模拟，并且在模拟中加入了 M33，是一个三星系并合模拟。

2019 年，van der Marel 等人[15]在 V19 中利用 Gaia DR2 的数据给出 M31 的最新自行结果。经换算，在 68% 的置信度上，M31 切向速度 $V_{\mathrm{tan,DR2}}=133^{+70}_{-68}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，结合 2012 年 HST 给出的切向速度 $V_{\mathrm{tan,HST}}=36^{+39}_{-26}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，加权平均的结果为 $V_{\mathrm{tan,DR2+HST}}=57^{+35}_{-31}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。工作 V19 最后便是利用该最新数据进行银河系与 M31 的 N 体模拟，此模拟还考虑了 M33 和大麦哲伦云，是一个四星系并合模拟。

M31 最新切向速度的置信下限和置信上限分别为 $26\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 和 $92\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，置信区间较宽，因此 S20 固定径向速度 ($V_{\mathrm{r}}=-115.7\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$)、改变切向速度，并进行多组模拟[27]，图 1 展示了 S20 中银河系与 M31 的初始状态。然而，S20 的设置略有不足，因为人类观测到的 M31 视向速度与自行是在太阳系内观测的，而进行模拟时 M31 的径向速度与切向速度是相对于银河系 (中心) 的，太阳系的位置与银心的位置存在一定偏差，所以，“自行”对应的方向其实并不是精确的“切向”，其还提供了极小部分 M31 相对于银河系的径向速度；“视向速度”对应的方向也不是精确的“径向”，其还提供了一小部分 M31 相对于银河系的切向速度。因此，不能完全固定径向速度而改变切向速度，同时也不能仅仅在一个方向改变切向速度数值，切向速度矢量应当不是在一条直线上而是在一个平面内变化。当然这些“不足”对模拟结果影响甚微，S20 的这一操作也仅仅是为了研究不同切向速度对并合时间的影响；只是从更严格的意义上来讲，这些设置可以改进。



注：此图为 S20 中的图 2，展示了模拟的初始状态下银河系与 M31 的位置、速度矢量与自转角动量矢量。

图 1　S20 中银河系与 M31 的初始空间关系[27]

改进的方法可以参照 V12[28]。因为其包含 3 个星系，显然无法简单地用径向速度和切向速度将银河系、M31、M33 进行组合，必须要在一个三维坐标系中给出每个星系具体的

坐标和速度矢量，该三维坐标系便是银心参考系 (Galactocentric frame)。不同于银道坐标系 (Galactic coordinate system，原点为太阳)，银心参考系的原点为银河系中心，因此银河系的初始坐标为 $(0,0,0)\,\mathrm{kpc}$，初始速度为 $(0,0,0)\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。银心参考系是一个左手系，其中 x 轴指向太阳，z 轴指向北银极。我们可以将其他星系的赤经、赤纬、距离、视向速度、赤经方向自行 (pmra)、赤纬方向自行 (pmdec) 转化为银心参考系下的坐标 x、y、z 与速度 V_x、V_y、V_z。转化时需要根据太阳相对于银心的位置以及速度进行修正，目前普遍接受的数据[36, 37]为：太阳与银心的距离 $r = 8.29\,\mathrm{kpc}$，太阳所在半径处银河系的旋转速度 $V_0 = 239\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$，太阳的本动速度 $(U,V,W)_\odot = (11.1, 12.24, 7.25)\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。总而言之，星系并合模拟工作需要选定一个合适的坐标系，根据观测者位置与该坐标系原点的差异，计算出每个星系在该坐标系下的位置与速度，从而将孤立星系的 IC 文件正确并合。

4 星系并合 N 体模拟

最终的 IC 文件构建完成后，正式的模拟便可以进行，这时需要选择一款合适的 N 体模拟软件。本章将主要介绍一个 N 体模拟软件系列，同时附上近些年来研究人员在模拟工作中针对某些情形积累的一些经验。

4.1 GADGET 系列

N 体模拟界最负盛名的当属 Springel 等人开发的 GADGET (GAlaxies with Dark matter and Gas intEracT)[38]系列软件，目前使用最广泛的版本是 Springel 在 2005 年发布的 GADGET-2[17]，下面对其进行简要介绍。

GADGET-2 是一个能够在具有分布式内存的大规模并行计算机上进行 N 体模拟 (包括气体动力学) 的开源代码，可以用于牛顿力学或大尺度上的宇宙学模拟。GADGET-2 中 N 体模拟的核心算法为 TreePM 算法 (也用到了 SPH，全称为光滑粒子流体动力学，其与气体动力学的计算相关，这里不多赘述)，TreePM 算法结合了 Tree[39]与 PM (particle mesh，粒子网格)，不同于 PP 算法 (即“粒子-粒子”算法，这种算法是最基础的，直接求解每个粒子与其他所有粒子间的相互作用，相应的时间成本很高，与粒子数的平方成正比)，它通过构建 Tree 划分粒子，根据 Tree 节点判断远近将粒子间的作用力分为近场和远场，近场可以直接计算，远场则采用 PM 算法。这样大大提高了模拟效率，运行时间从 $O(N^2)$ 降至 $O(N\lg N)$ (N 为粒子数)。

在利用 GADGET-2 进行模拟前，使用者需要在参数文件中填写相应的参数：IC 文件和输出文件的名称、路径、格式，模拟快照和数据文本的输出频率，模拟的时间跨度，基本宇宙学参数 (对于牛顿力学的模拟并无影响) 和 SPH 参数 (对于无气体粒子的模拟并无影响)，计算机相关参数 (如允许运行的时间上限、允许使用的内存)，软化长度等。所有参数在 GADGET-2 的使用者手册里都有简单介绍与参考值，但其中软化长度的设定则是要经过相当多的考量，它也是 N 体模拟中极为重要的一个参数，本文的 4.2 节会对其设定作出说明。

开始模拟后，设定的路径下会输出一系列记录模拟过程的文本文件 (其中大部分用处不大，一般仅在模拟出问题时才阅读这些文本记录以进行检查) 和快照文件，编写代码对快照文件进行读取与分析即可获得数据与可视化的结果。

C08 选用的模拟软件即为 GADGET-2，而 V12 选用另一个版本 GADGET-3，如今 GADGET 系列的最新版软件是 GADGET-4[40]，它在代码语言、软件功能、文件逻辑与界面等方面进行了优化。GADGET 系列软件还有一些“衍生品”，比如 Hopkins[41] 根据 GADGET-3 修改而来的 GIZMO，GIZMO 的功能非常之广，可以在模拟中考虑磁场、化学元素、辐射、黑洞吸积、宇宙线等。除了 GADGET 系列以外，也有其他 N 体模拟软件，如 S20 中使用的 HiGPUs[42]，这里不再介绍。

4.2　N 体模拟常见问题处理

4.2.1　粒子质量的设定

给所有粒子设置相同的质量 (如 C08) 似乎是一个自然的选择，但注意到对于银河系与 M31 这样的星系，暗物质晕占了 90% 以上的质量，如果暗物质晕与恒星 (包括星系盘与核球) 粒子的质量相等，那么在总粒子数较小的情况下，可见物质粒子数就会很有限，影响研究者对于某些结构的判断和认知。所以，在一些工作 (如 V12) 中不同种类粒子的质量并不相等[28]，这样研究者所关注的部分则会由更多粒子组成。不过在引力作用下，重粒子更易聚集在中心，轻粒子则可能会被“弹出”，系统的密度分布、稳定性与演化轨迹将受到影响，所以粒子质量也不宜相差过大，具体设置视所研究的问题而定。

4.2.2　星系中心的标定

当计算银河系中心与 M31 中心的距离时，可以计算两个星系的质心从而研究质心间的距离；不过严格意义上来讲星系并不是对称的结构，质心并不等同于中心，所以更自然的方法是用密度最高点或者势能最低点标定中心，于是，可以在每个星系中心置入大质量黑洞，黑洞质量大故而会处于势能最低点。但由于计算机模拟和现实情形存在区别，其中普通粒子的质量可能已经很大 (比如用 10^5 个粒子模拟质量为 $1\times10^{12}\,M_\odot$ 的银河系时，每个粒子的质量已经达到 $10^7\,M_\odot$)，这时便不能将黑洞质量设置为实际值，而应当使之显著大于普通粒子质量，如 S20 中就将银河系与 M31 的中心黑洞质量设置为 $10^9\,M_\odot$ 量级[27]。这一设置虽然偏离实际，但在并合发生前对星系尺度的动力学影响甚微，如原文中所言：并合前超大质量黑洞只是星系中心“被动的客人”。

4.2.3　软化长度的设置

软化长度 ϵ (文中采用的单位为 kpc) 是 N 体模拟工作中的重要参数，它一方面避免了引力发散的数值效应：计算机模拟中，当两个粒子距离很近时，万有引力公式中的分母值过于小；另一方面也具有物理含义：N 体模拟中的粒子代表的不是单颗恒星，而是上万颗恒星的集合，恒星碰撞截面相对于平均距离极小，碰撞概率极低，因而两团恒星交会时应该是穿过彼此而不是碰撞弹开。软化长度的设置有一个经验公式：

$$\epsilon = 32\sqrt{\frac{M_\mathrm{p}}{10^{10}\,M_\odot}}\ , \tag{10}$$

其中，$M_{\rm p}$ 为所研究的单个粒子的质量。经分析，这一经验公式适用于一般的星系并合模拟，如银河系与 M31 的并合。

软化长度也可以理解为模拟的空间分辨率，在软化长度尺度下的动力学过程都是不可靠的，存在非物理的数值效应。但软化长度并不是越小越好，一方面，GADGET-2 中无碰撞粒子的步长判据为:

$$\Delta t = \min\left[\Delta t_{\rm max}, \left(\frac{2\eta\epsilon}{|\boldsymbol{a}|}\right)^{1/2}\right] \quad , \tag{11}$$

其中，Δt 为步长，$\Delta t_{\rm max}$ 是人为设定的最大步长，η 是与模拟精度相关的参数，$\boldsymbol{a}$ 是粒子的加速度。因此，软化长度减小时，模拟所花的时间将增加。另一方面，如前文所提，由于粒子数有限，计算机模拟中每个粒子的质量其实很大，其势阱也非常陡峭，软化长度的引入恰恰使引力势的轮廓更加平滑，在某种意义上能较好地符合实际情况。

软化长度的经验公式也不唯一。Rodionov 和 Sotnikova[43]给出依赖于粒子数的经验公式：

$$\epsilon = 0.58N^{-0.26} \quad , \tag{12}$$

其中，N 为模拟中的总粒子数，适用范围为 $30 \leqslant N \leqslant 300\,000$。van den Bosch 和 Ogiya[44]则针对特定的暗物质晕粒子给出经验公式：

$$\epsilon = 0.05\left(\frac{N_{\rm p}}{10^5}\right)^{-1/3} , \tag{13}$$

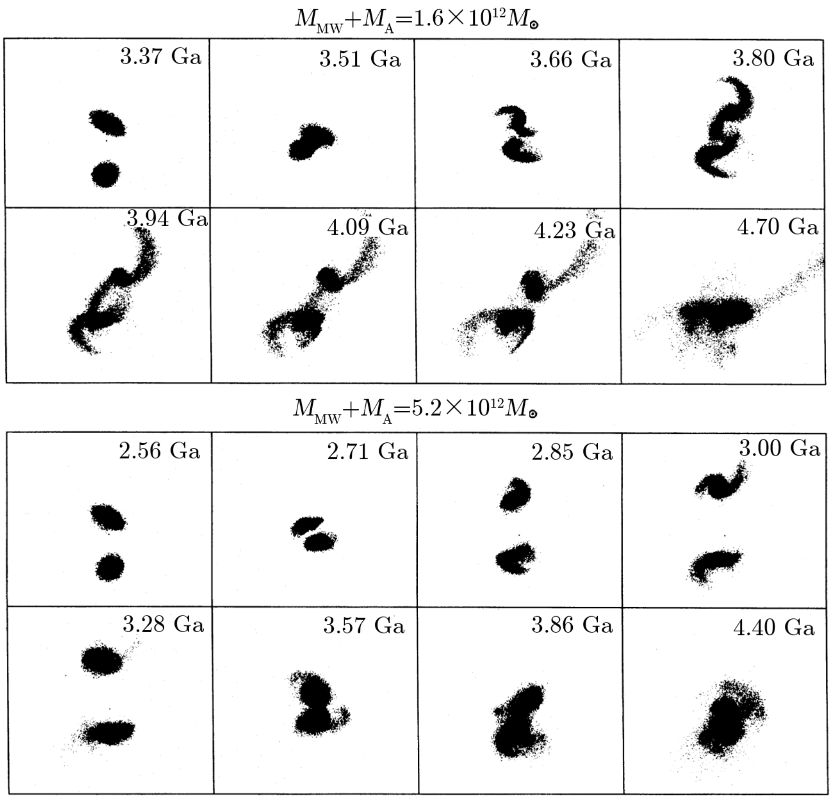
其中，$N_{\rm p}$ 为粒子数。但无论何种经验公式都只是一个参考，最终的设置还是要看具体的模拟需求，事实上，许多工作中软化长度的设置与这些经验公式相去甚远。

5 星系并合模拟结果

前文主要选取了横跨 25 a 的 5 项银河系与仙女座星系并合模拟代表性工作：D96、C08、V12、V19、S20。现将这些工作的结果进行展示。

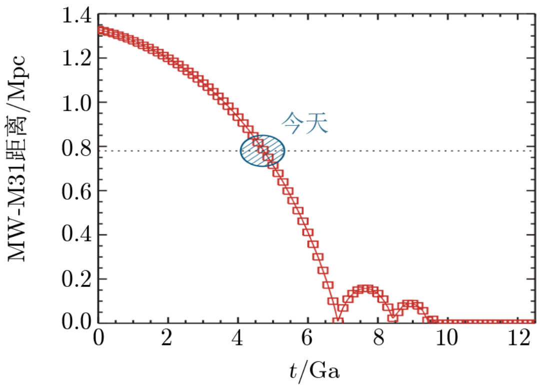
D96 并不是专门研究银河系与 M31 并合的工作，所以给出的结论也主要着眼于其主题——星系的潮汐尾：小质量的银河系与 M31 模型在首次交会后的很短时间内就完成并合，并合时刻为 4.7 Ga，且交会过程中会产生延伸至很远的明显潮汐尾。大质量的银河系与 M31 模型，由于加速度比小质量模型大，第一次交会时相对速度很大，只产生很短的潮汐尾并且潮汐尾很快就消失，接着两星系分离至反方向后又重新接近；第二次交会时也未能产生明显的潮汐尾，随后两者于大约 4.4 Ga 时并合[26] (模拟的可视化结果如图 2 所示)。

C08 的模拟结果 (星系的距离-时间曲线见图 3) 显示：银河系与 M31 将于 5 Ga 以内完成并合 (此时太阳尚未死亡)，最终形成一个椭圆星系。在两星系第一次交会时，太阳有可能被抛射到一个潮汐尾中，且之后仍有较大概率在该潮汐尾上停留；另外太阳也有较小的可能性到达更接近 M31 主体的区域[3]。



注：此图为 D96 中的图 13，分别展示了小质量 (上) 与大质量 (下) 模型中银河系与 M31 的并合过程。模拟中所选择的切向速度使得两星系产生近距离且顺行的交会 (顺行并合时，盘上的恒星处于共振态，靠近扰动体一侧的恒星被持续拉进，远离扰动体的恒星被持续推出[45, 46])，从而使星系盘内物质受到尽可能大的作用，最终小质量模型产生了较明显的潮汐尾，大质量模型则未能成功产生。

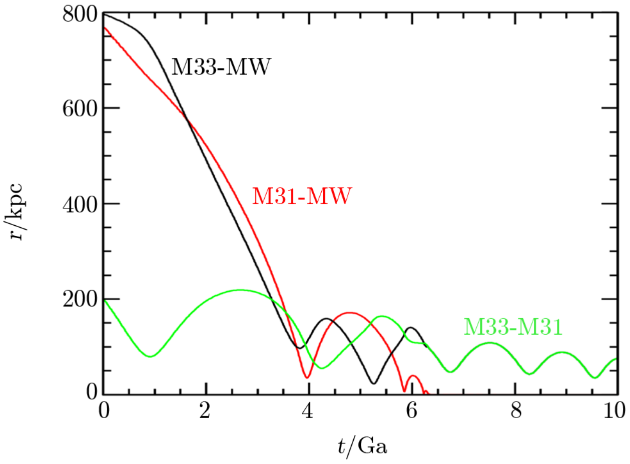
图 2　D96 中银河系与 M31 并合过程[26]



注：此图为 C08 中的图 5，展示了银河系与 M31 距离 (纵坐标) 随时间 (横坐标) 的变化曲线。水平虚线对应的距离为 780 kpc，接近于如今两星系间的距离，其在模拟中对应的时刻约为 4.7 Ga，故该模拟的零时刻相当于 −4.7 Ga。

图 3　C08 中银河系与 M31 的距离-时间图像[3]

V12 则表明，银河系与 M31 将于 $3.87^{+0.42}_{-0.32}$ Ga 时第一次交会，近心距为 $31.0^{+38.0}_{-19.8}$ kpc，两者将于 $5.86^{+1.61}_{-0.72}$ Ga 时完成并合 (见图 4)。数值存在上下限，是因为该工作考虑了 M31 自行的误差范围，采用了“半解析”的蒙特卡洛模拟方法。对于 M31 和 M33，两者第一次交会的时间为 $0.85^{+0.18}_{-0.13}$ Ga，近心距为 $80.8^{+42.2}_{-31.7}$ kpc。对于银河系与 M33，两者第一次交会的时间为 $3.70^{+0.74}_{-0.46}$ Ga，近心距为 $176.0^{+239.0}_{-136.9}$ kpc。最可能的结果是银河系与 M31 并合后，M33 在周围轨道上绕转，稍后再落入其中；但也有 M33 在与银河系的第一次交会时便直接落入的可能，这样 M33 将先于 M31 与银河系并合；另外，M33 也有可能暂时或永久地被抛出本星系群。银河系与 M31 的并合产物将是一个椭圆星系，太阳将移动至离银心更远的地方，且未来太阳可能穿越 M33[28]。



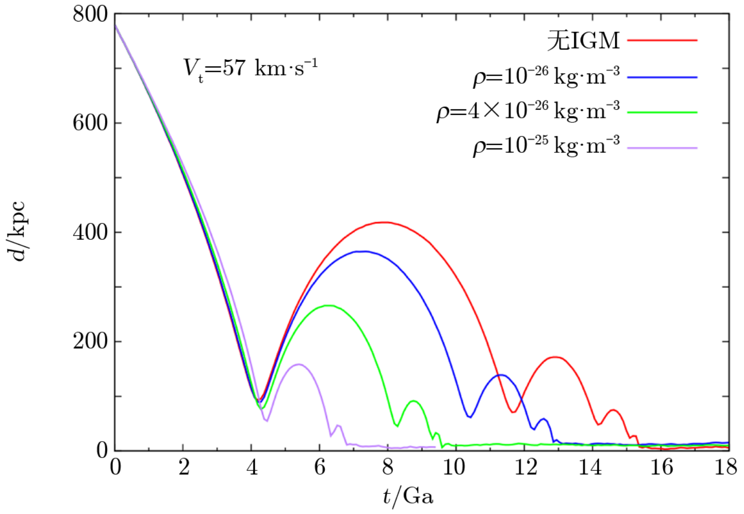
注：此图为 V12 中的图 3，展示了主模拟中银河系、M31 与 M33 三者之间距离 (纵坐标) 随时间 (横坐标) 的变化曲线。

图 4　V12 中银河系、M31、M33 之间的距离-时间图像[28]

V19 中的 N 体模拟并不关注两个星系最终的并合，而主要着眼于首次交会的时间与近心距。其指出，银河系与 M31 将于约 4.5 Ga 时发生第一次交会，近心距约为 130 kpc；而考虑 M33 和大麦哲伦云的影响后，首次交会时间推迟了大约 1 Ga，近心距减小至约 75 kpc[15]。

S20 给出的银河系与 M31 首次交会时间为 4.3 Ga，但并合将在 10 Ga 之后完成，这一时间比前面的工作要晚很多，由较高的 M31 切向速度与较低的 IGM 密度共同导致，图 5 展示了一部分结果。该工作还利用 ARWV 代码[47, 48]研究了星系并合后两个超大质量黑洞的行为，指出两个黑洞将于星系并合后的 16.6 Ma 内并合。另外该工作给出了 M31 的切向速度、星系的暗物质晕半径、IGM 密度、模拟所用粒子数这些条件对并合的影响，并计算了黑洞并合过程中的引力波辐射[27]。

以上工作的主要参数和结果见表 2。由于 V19 并不是一个完整的并合模拟工作，未给出并合时间，所以此处未展示之。



注：此图为 S20 中图 5 的一部分，展示了切向速度 $V_t = 57\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$ 的情况下，不同 IGM 密度对银河系与 M31 并合时间的影响。横坐标表示时间，纵坐标表示距离。

图 5　S20 中银河系与 M31 的距离-时间图像[27]

表 2　D96、C08、V12、S20 的主要参数与结果

参数	D96(小)	D96(大)	C08	V12	S20
$M_{\mathrm{MW}}\,/\,10^{12}M_\odot$	0.5	1.7	1.0	1.5	1.0
$M_{\mathrm{M31}}\,/\,10^{12}M_\odot$	1.1	3.6	1.6	1.5	1.6
$D_{\mathrm{initial}}\,/\,\mathrm{kpc}$	700	700	780	770	780
$V_{\mathrm{r}}\,/\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$	−130	−130	−135	−109.2	−115.7
$V_{\mathrm{t}}\,/\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$	20	26	132	27.7	57
IGM 含量	0	0	$2.6\times10^{12}M_\odot$	0	$10^{-26}\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$
$T_{\mathrm{m}}\,/\,\mathrm{Ga}$	4.7	4.4	≈ 5	5.86	>10

注：D96 的小质量模型和大质量模型无主次之分，所以此表都进行了展示。表第 2−8 行分别指银河系质量、M31 质量、银河系与 M31 初始距离、M31 径向速度、M31 切向速度、IGM 含量 (C08 从质量角度定义、S20 从密度角度定义)、并合完成的时间。

一般来说，银河系与 M31 的总质量越大、初始距离越近、径向速度越大，则并合发生的时间越早；而并合时间点会随着切向速度的增加而显著推迟；另外，当 IGM 的数量相当可观时，其提供的摩擦会使得星系并合的时间点大大提前，两星系于首次交会后不久即发生并合。

6　总结与展望

星系并合 N 体模拟工作的操作流程 (如图 6 所示) 为：(1) 构建星系模型 (确定星系质量等参数和选择星系各成分的分布轮廓)；(2) 生成初始条件 (IC) 文件 (生成孤立星系 IC 文件

及根据相对位置和相对速度将多个 IC 文件组合成一个新 IC 文件)；(3) 正式运行模拟；(4) 分析模拟结果。

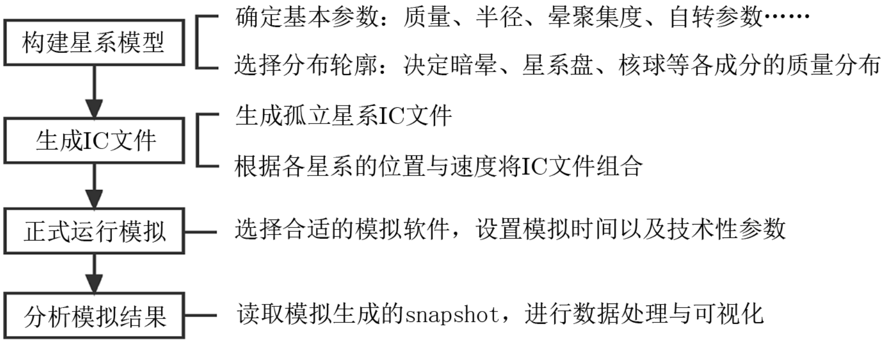


图 6　星系并合 N 体模拟工作操作流程

本文以上述流程为线索，介绍了几十年来银河系与 M31 并合模拟工作的研究进展，并选取了近 25 年间的 5 篇代表性工作 (D96、C08、V12、V19、S20) 进行比较。

就星系质量而言，早期人们的估计误差范围较大，如今普遍接受的结论是：银河系的质量[49] 约为 $1.0 \times 10^{12}\,M_\odot$ 或者 $1.5 \times 10^{12}\,M_\odot$，M31 的质量约为 $1.5 \times 10^{12}\,M_\odot$ 或者 $2.0 \times 10^{12}\,M_\odot$ (但也有最新结果显示其可能接近 $3.0 \times 10^{12}\,M_\odot$)。这些质量在星系内部的分布则可以用一些轮廓来描述，暗物质晕常用 Hernquist 轮廓或 NFW 轮廓进行描述，星系盘常用指数轮廓或 Miyamoto-Nagai 盘等进行描述，核球常用 Hernquist 轮廓或 Plummer 球等进行描述。

GALIC、DICE、MakeDisk 等初始条件生成器的出现，使得在计算机中创建星系粒子模型的操作更方便，而根据星系之间的相对位置和相对速度将各个星系粒子模型进行组合，才能够得到 N 体模拟所要用的最终初始条件文件。近几十年来，人们对 M31 的位置和径向速度认知的改变并不大，如今测得 M31 的距离约为 770 kpc，径向速度约为 $-109\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。而 M31 的自行直到 2012 年才被 HST 首次正式测定，又于 2019 年被 Gaia 再次测定，将两个结果加权平均并换算得出的 M31 切向速度为 $57^{+35}_{-31}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$。为了更准确地描述本星系群内星系的空间位置以及速度关系，可以将各星系的位置和速度转换到银心参考系下，从而给出三维空间中具体的图像。

GADGET 系列软件是 N 体模拟界最著名的软件，近 20 年间 GADGET 发行了不少新版本与衍生品。当把初始条件文件输入 N 体模拟软件后，将会有一系列的快照文件输出，读取与分析这些快照文件，我们将一览星系并合的历程。

本文选取的 5 篇代表性工作，尽管初始条件各异，但银河系与 M31 的首次交会时间均约为 4 Ga；而最终并合时间却因模拟参数的不同而大相径庭。这些工作也并非只研究了宏观上的并合结果，还关注太阳的未来命运、星系中心黑洞的并合等。

银河系与 M31 的并合模拟工作已经取得了相当大的成功，但依然有可以改进的地方：(1) 随着观测能力的进一步提高，M31 的自行和本星系群的质量估计有了新的结果，这需要

在模拟中做出相应的改变；(2) 部分参数的误差范围仍然较大，需要进行覆盖全部误差范围的模拟工作；(3) 本星系群中除了银河系与 M31 之外其他成员的影响也不可忽略，多星系模拟可能成为未来的一种趋势；(4) 包含复杂物理过程的模拟越来越热门，银河系与 M31 未来并合过程中的恒星形成、黑洞生长等将是很有价值的课题。

参考文献：

[1] Carlsten S G, Greco J P, Beaton R L, et al. ApJ, 2020, 891: 144
[2] van den Bergh S. Astronomy and Astrophysics Review, 1999, 9: 273
[3] Cox T J, Loeb A. MNRAS, 2008, 386: 461
[4] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics. Princeton: Princeton University Press, 1987: 16
[5] van der Marel R P, Fardal M, Besla G, et al. ApJ, 2012, 753: 8
[6] Sohn S T, Anderson J, van der Marel R P. ApJ, 2012, 753: 7
[7] Toomre A, Toomre J. ApJ, 1972, 178: 623
[8] Plummer H C. MNRAS, 1911, 71: 460
[9] Miyamoto M, Nagai R. PASJ, 1975, 27: 533
[10] Hernquist L. ApJ, 1990, 356: 359
[11] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. ApJ, 1997, 490: 493
[12] Klypin A, Zhao H, Somerville R S. ApJ, 2002, 573: 597
[13] Watkins L L, van der Marel R P, Sohn S T, et al. ApJ, 2019, 873: 118
[14] Patel E, Mandel K S. ApJ, 2023, 948: 104
[15] van der Marel R P, Fardal M A, Sohn S T, et al. ApJ, 2019, 872: 24
[16] Yurin D, Springel V. MNRAS, 2014, 444: 62
[17] Springel V. MNRAS, 2005, 364: 1105
[18] De Rosa A, Vignali C, Bogdanović T, et al. New Astronomy Reviews, 2019, 86: 1525
[19] Springel V, Di Matteo T, Hernquist L. MNRAS, 2005, 361: 776
[20] Kahn F D, Waltjer L. ApJ, 1959, 130: 705
[21] Freeman K C. ARA&A, 1987, 25: 603
[22] Braun R. ApJ, 1991, 372: 54
[23] Walterbos R A M, Kennicutt R C. A&A, 1988, 198: 61
[24] Tully R B, Fisher J R. A&A, 1977, 54: 661
[25] Raychaudhury S, Lynden-Bell D. MNRAS, 1989, 240: 195
[26] Dubinski J, Mihos J C, Hernquist L. ApJ, 1996, 462: 576
[27] Schiavi R, Capuzzo-Dolcetta R, Arca-Sedda M, et al. A&A, 2020, 642: A30
[28] van der Marel R P, Besla G, Cox T J, et al. ApJ, 2012, 753: 9
[29] Patel E, Besla G, Sohn S T. MNRAS, 2017, 464: 3825
[30] de Vaucouleurs G. Annales d'Astrophysique, 1948, 11: 247
[31] Young P J. AJ, 1976, 81: 807
[32] Perret V, Renaud F, Epinat B, et al. A&A, 2014, 562, A1
[33] Gnedin O Y, Kravtsov A V, Klypin A A, et al. ApJ, 2004, 616: 16
[34] McConnachie A W, Irwin M J, Ferguson A M N, et al. MNRAS, 2005, 356: 979
[35] Ribas I, Jordi C, Vilardell F, et al. ApJ, 2005, 635: L37
[36] McMillan P J. MNRAS, 2011, 414: 2446
[37] Schönrich R, Binney J, Dehnen W. MNRAS, 2010, 403, 1829
[38] Springel V, Yoshida N, White S D M. New Astronomy, 2001, 6: 79
[39] Barnes J, Hut P. Nature, 1986, 324: 446

[40] Springel V, Pakmor R, Zier O, et al. MNRAS, 2021, 506: 2871
[41] Hopkins P F. MNRAS, 2015, 450: 53
[42] Capuzzo-Dolcetta R, Spera M, Punzo D. Journal of Computational Physics, 2013, 236: 580
[43] Rodionov S A, Sotnikova N Ya. Astronomy Reports, 2005, 49: 470
[44] van den Bosch F C, Ogiya G. MNRAS, 2018, 475: 4066
[45] 常江. 天文学报, 2015, 56: 541
[46] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics. Second Ed. Princeton: Princeton University Press, 2008: 639
[47] Mikkola S, Tanikawa K. MNRAS, 1999, 310: 745
[48] Merritt D, Mikkola S, Szell A. ApJ, 2007, 671: 53
[49] Wang W, Han J, Cautun M, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2020, 63: 9801

Merger of the Milky Way and the Andromeda Galaxy with *N*-body Simulations

ZHOU Yu-fan[1,2], LI Zhi-yuan[1,2], CHANG Jiang[3]

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China; Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210046, China; 3. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China)

Abstract: The Local Group contains nearly one hundred galaxies of various sizes and shapes, including the Milky Way (MW), the Andromeda Galaxy (M31), the Triangulum Galaxy (M33), the Magellanic Clouds and so on. M31 is the most massive and brightest galaxy in the Local Group. Studies of the Local Group have significant implications for understanding the interactions and evolution of galaxies, as well as cosmology. According to the hierarchical clustering theory of the universe, galaxies grow through mergers. In addition to numerous satellite galaxy mergers in the Local Group, there may also be a future merger between the two large galaxies, the Milky Way and M31. Observations indeed indicate that M31 and the Milky Way are approaching each other and will merge in the future. As a powerful tool for studying galaxy mergers, N-body simulation has rapidly matured during the past half century and played an important role in our quantitative understanding of galaxy mergers. Thanks to the development of galaxy structure theories, observational capabilities and N-body simulation software, information about the Milky Way and M31 has become increasingly clear, thus our understanding of the merger between the Milky Way and M31 has become more detailed. This article presents a brief overview of N-body simulations of the merger between M31 and MW, with an emphasis on the simulation procedure, as well as a comparison of recent results. Valuable future directions are also discussed.

Key words: N-body simulations; Milky Way; the Andromeda Galaxy; merger; Local Group